

ПАРЫ ТРАНСНЕПТУНОВЫХ ОБЪЕКТОВ НА БЛИЗКИХ ОРБИТАХ

Э. Д. Кузнецов, О. М. Аль-Шиблави, В. Д. Гусев, Д. С. Устинов

Уральский федеральный университет

Выполнен поиск пар динамически коррелированных транснептуновых объектов с большими полуосями орбит более 30 а. е. с использованием метрик Холшевникова в пространстве кеплеровых орбит. Обнаружено 27 пар с метриками менее $0.07 \text{ (а. е.)}^{1/2}$, 22 пары, в которых один из компонентов является двойным, при значениях метрик менее $0.12 \text{ (а. е.)}^{1/2}$, и 11 пар двойных транснептуновых объектов при значениях метрик менее $0.3 \text{ (а. е.)}^{1/2}$. Сделан вывод, что пара 2004 VA₁₃₁ — 2004 VU₁₃₁ может быть самой молодой парой транснептуновых объектов из известных на сегодняшний день.

PAIRS OF TRANS-NEPTUNIAN OBJECTS WITH CLOSE ORBITS

E. D. Kuznetsov, O. M. Al-Shiblawi, V. D. Gusev, D. S. Ustinov

Ural Federal University

A search for pairs of dynamically correlated trans-Neptunian objects with semi-major axes of more than 30 au was performed. The Kholshchevnikov metrics in the space of Keplerian orbits are used. Found 27 pairs with metrics less than $0.07 \text{ au}^{1/2}$, 22 pairs in which one of the components is binary, for metrics less than $0.12 \text{ au}^{1/2}$, and 11 pairs of binary trans-Neptunian objects with metrics less than $0.3 \text{ au}^{1/2}$. It is concluded that the pair 2004 VA₁₃₁ — 2004 VU₁₃₁ may be the youngest pair of trans-Neptunian objects known today.

Введение

После открытия Плутона и Харона первый транснептуновый объект (ТНО) был обнаружен в 1992 г. В настоящее время известно около 3500 ТНО. Распределение орбит малых тел Солнечной системы является результатом различных процессов, протекающих длительное время (см., например, [1, 2]).

Как показано в [3], в главном поясе астероидов существует большое количество пар астероидов с близкими орбитами, имеющих общее происхождение. Исследование этих пар [4] подтвердило их статистическую значимость. Были обнаружены пары астероидов, не принадлежащие группам или семействам [5–7]. Одна пара была обнаружена среди объектов рассеянного диска [8]. Как правило, пары определяют скопления молодых астероидов [9, 10].

Образование пар или групп малых тел на близких орбитах может происходить в результате действия различных процессов: разрушения в результате столкновений, дробления вследствие вращения, распада двойных систем и др. (см., например, [11–13]). Вековые резонансы и резонансы средних движений также могут приводить к движению объектов по сходным орбитам (см., например, [14]).

Предположение о возможном существовании столкновительных семейств малых тел за орбитой Нептуна было высказано в [15]. Первое семейство, идентифицированное во внешней части Солнечной системы, было связано с карликовой планетой (136108) Науша [16]. Задача поиска столкновительных семейств ТНО рассматривалась в [17] и [18]. В работе [19]

© Кузнецов Э. Д., Аль-Шиблави О. М., Гусев В. Д., Устинов Д. С., 2021

выполнен систематический поиск статистически значимых пар и групп динамически коррелированных объектов с большими полуосями орбит более 25 а. е. Для выделения пар ТНО анализировались положения полюсов орбит и перигелиев совместно с разностями времени прохождения перигелия. Было подтверждено существование пары 2000 FC₈ — 2000 GX₁₄₆, указанной в [15]. Были выделены кандидаты в четыре новых столкновительных семейства ТНО, связанных с парами (134860) 2000 OJ₆₇ — 2001 UP₁₈, 2003 UT₂₉₁ — 2004 VB₁₃₁, 2002 CU₁₅₄ — 2005 CE₈₁ и 2003 HF₅₇ — 2013 GG₁₃₇. Также были найдены несколько пар ТНО, которые могут иметь общее происхождение: (135571) 2002 GG₃₂ — (160148) 2001 KV₇₆ и 2005 GX₂₀₆ — 2015 BD₅₁₉.

В данной работе выполняется поиск пар динамически коррелированных ТНО с большими полуосями орбит более 30 а. е. с использованием метрик Холшевникова [20, 21] в пространстве кепперовых орбит.

Описание методики

Для поиска пар ТНО на близких орбитах использовались метрики Холшевникова ϱ_2 и ϱ_5 [20, 21]. Метрика ϱ_2 определена в 5-мерном пространстве кепперовых орбит (не учитывается положение на орбите). Метрика ϱ_5 определена в 3-мерном фактор-пространстве позиционных элементов (большая полуось a , эксцентриситет e , наклон i) как минимальное значение ϱ_2 при всех возможных положениях узлов и перицентров орбит.

Анализ этих метрик позволяет выделить кандидатов в молодые пары ТНО, для которых положения линий узлов и линий апсид должны быть близки, а следовательно, $\varrho_2 \approx \varrho_5$. Для поиска пар мы использовали каталоги элементов орбит Asteroids Dynamic Site — AstDyS (<https://newton.spacedys.com/astdys/>) для нумерованных объектов и объектов, наблюдавшихся в нескольких оппозициях, на эпохи MJD 58400 (00^h 00^m 00.000^s BDT 09.10.2018) и MJD 58800 (00^h 00^m 00.000^s BDT 13.11.2019). Использовались следующие критерии отбора кандидатов в молодые пары ТНО: $\varrho_2 < 0.07$ (а. е.)^{1/2}, $\varrho_5 < 0.07$ (а. е.)^{1/2} и $\varrho_2 - \varrho_5 < 0.015$ (а. е.)^{1/2}. Также отбирались пары, включающие двойные ТНО, при $\varrho_2 < 0.12$ (а. е.)^{1/2} и пары, в которых оба ТНО двойные: $\varrho_2 < 0.3$ (а. е.)^{1/2}.

Результаты поиска пар транснептуновых объектов

В результате поиска пар динамически коррелированных транснептуновых объектов с большими полуосями орбит более 30 а. е. обнаружено 27 пар ТНО с метрикой $\varrho_2 < 0.07$ (а. е.)^{1/2}, 22 пары, в которых один из ТНО является двойным ($\varrho_2 < 0.12$ (а. е.)^{1/2}), и 11 пар двойных ТНО ($\varrho_2 < 0.3$ (а. е.)^{1/2}).

В таблице приведены пары транснептуновых объектов с метриками $\varrho_2 \leq 0.0632$ (а. е.)^{1/2} ($\varrho_2^2 \leq 0.0040$ а. е. = 6.0×10^5 км). Возможно, что пара 2004 VA₁₃₁ — 2004 VU₁₃₁ с минимальными метриками ϱ_2 и ϱ_5 является самой молодой парой ТНО из известных на сегодняшний день.

Анализ элементов орбит ТНО, входящих в пары (см. таблицу), показал, что все объекты можно отнести к холодным классическим объектам пояса Койпера. Максимальные эксцентриситеты орбит наблюдаются у ТНО, входящих в пару 2004 VA₁₃₁ — 2004 VU₁₃₁, и составляют 0.0937 и 0.0945 соответственно. Максимальные наклоны орбит достигают 5° для ТНО пары (500839) 2013 GW₁₃₇ — 2015 GZ₅₈.

Особый интерес представляют случаи, когда возможно расположение ТНО пары по разные стороны зон резонансов средних движений (с учетом ошибок определения больших полуосей орбит). Пары ТНО 2003 QL₉₁ — 2015 VA₁₇₃, 2013 SD₁₀₁ — 2015 VY₁₇₀, (88268) 2001 KK₇₆ — 2015 GV₅₈, 2003 QD₉₁ — 2015 VC₁₇₃, 2000 ON₆₇ — 2013 UN₁₇ расположены в

Пара ТНО		$\rho_2, (\text{а. е.})^{1/2}$	$\rho_5, (\text{а. е.})^{1/2}$
2004 VA ₁₃₁	2004 VU ₁₃₁	0.0195	0.0054
1999 HV ₁₁	2015 VF ₁₇₂	0.0348	0.0316
2003 QL ₉₁	2015 VA ₁₇₃	0.0366	0.0331
2013 SD ₁₀₁	2015 VY ₁₇₀	0.0438	0.0392
2002 CY ₁₅₄	2005 EW ₃₁₈	0.0461	0.0377
(88268) 2001 KK ₇₆	2015 GV ₅₈	0.0542	0.0432
2000 PW ₂₉	2015 GL ₅₈	0.0587	0.0286
(468422) 2000 FA ₈	2000 YV ₁	0.0591	0.0420
2003 QD ₉₁	2015 VC ₁₇₃	0.0592	0.0387
2000 ON ₆₇	2013 UN ₁₇	0.0597	0.0457
2002 FW ₃₆	2015 VF ₁₇₀	0.0600	0.0239
(500839) 2013 GW ₁₃₇	2015 GZ ₅₈	0.0602	0.0182
(88268) 2001 KK ₇₆	2013 UL ₁₇	0.0620	0.0445
2013 UR ₁₇	2015 GY ₅₈	0.0632	0.0518

окрестности резонанса 7:12 ($a_{res} = 43.1$ а. е.). Пары 2000 PW₂₉ — 2015 GL₅₈ и 2013 UR₁₇ — 2015 GY₅₈ — в окрестности резонанса 5 : 9 ($a_{res} = 44.5$ а. е.).

Обсуждение результатов и заключение

Проверка вывода, что пара 2004 VA₁₃₁ — 2004 VU₁₃₁ является самой молодой парой ТНО из известных на сегодняшний день, требует исследования вероятностной эволюции. Результаты численного моделирования с помощью комплексов программ Orbit9 и Mercury на основе номинальных орбит ТНО 2004 VA₁₃₁ и 2004 VU₁₃₁ из каталога AstDyS на эпоху MJD 58800 показывают, что ближайшее к современной эпохе низкоскоростное сближение на расстояние менее радиуса Хилла при скорости, меньшей второй космической, могло реализоваться 15.6 года назад.

По современным представлениям, большая часть холодных классических объектов пояса Койпера сформировалась в виде двойных объектов. Наблюдаемые пары ТНО на близких орбитах могут быть результатом распада этих двойных систем вследствие неустойчивости, развивающейся под действием внешних возмущающих факторов.

Проведенное исследование является начальным этапом изучения динамических свойств пар ТНО на близких орбитах. В дальнейшем предполагается исследование вероятностной эволюции пар ТНО с целью уточнения их возраста. Отдельно будут исследоваться пары, в которые входят двойные ТНО. Эти пары представляют особый интерес, так как они могли образоваться в результате распада кратных ТНО.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FEUZ-2020-0038.

Библиографические ссылки

- [1] *Deienno R., Gomes R. S., Walsh K. J. et al.* Is the Grand Tack model compatible with the orbital distribution of main belt asteroids? // *Icarus*. — 2016. — Vol. 272. — P. 114–124. 1701.02775.

- [2] *Granvik M., Morbidelli A., Vokrouhlický D. et al.* Escape of asteroids from the main belt // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 598. — P. A52.
- [3] *Vokrouhlický D., Nesvorný D.* Pairs of Asteroids Probably of a Common Origin // *Astron. J.* — 2008. — Vol. 136, № 1. — P. 280–290.
- [4] *Pravec P., Vokrouhlický D.* Significance analysis of asteroid pairs // *Icarus.* — 2009. — Vol. 204, № 2. — P. 580–588.
- [5] *Pravec P., Vokrouhlický D., Polishook D. et al.* Formation of asteroid pairs by rotational fission // *Nature.* — 2010. — Vol. 466, № 7310. — P. 1085–1088. 1009.2770.
- [6] *Jacobson S. A.* Multiple origins of asteroid pairs // *Asteroids: New Observations, New Models* / ed. by S. R. Chesley, A. Morbidelli, R. Jedicke, D. Farnocchia : IAU Symposium. — 2016. — Vol. 318. — P. 55–65. 1511.00566.
- [7] *Kuznetsov E., Safronova V.* Application of metrics in the space of orbits to search for asteroids on close orbits // *Planet. Space Sci.* — 2018. — Vol. 157. — P. 22–27.
- [8] *Rabinowitz D., Schwamb M. E., Hadjijska E. et al.* A Tale of Two TNOs // *EPSC-DPS Joint Meeting* 2011. — 2011. — Vol. 2011. — P. 1642.
- [9] *Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D. et al.* Asteroid clusters similar to asteroid pairs // *Icarus.* — 2018. — Vol. 304. — P. 110–126.
- [10] *Kuznetsov E. D., Vasileva M. A.* On New Members of Asteroid Clusters Similar to Asteroid Pairs // *82nd Annual Meeting of The Meteoritical Society.* — 2019. — Vol. 82. — P. 6192.
- [11] *Benz W., Asphaug E.* Catastrophic Disruptions Revisited // *Icarus.* — 1999. — Vol. 142, № 1. — P. 5–20. [astro-ph/9907117](#).
- [12] *Boehnhardt H.* Split comets // *Comets II* / ed. by Michel C. Festou, H. Uwe Keller, Harold A. Weaver. — 2004. — P. 301.
- [13] *Jacobson S. A., Scheeres D. J.* Dynamics of rotationally fissioned asteroids: Source of observed small asteroid systems // *Icarus.* — 2011. — Vol. 214, № 1. — P. 161–178. 1404.0801.
- [14] *Fuente Marcos C. de la, Fuente Marcos R. de la.* Far from random: dynamical groupings among the NEO population // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 456, № 3. — P. 2946–2956. 1512.02139.
- [15] *Chiang E. I.* A Collisional Family in the Classical Kuiper Belt // *Astrophys. J. Lett.* — 2002. — Vol. 573, № 1. — P. L65–L68. [astro-ph/0205275](#).
- [16] *Brown M. E., Barkume K. M., Ragozzine D., Schaller E. L.* A collisional family of icy objects in the Kuiper belt // *Nature.* — 2007. — Vol. 446, № 7133. — P. 294–296.
- [17] *Chiang E. I., Lovering J. R., Millis R. L. et al.* Resonant and Secular Families of the Kuiper Belt // *Earth Moon and Planets.* — 2003. — Vol. 92, № 1. — P. 49–62.
- [18] *Marcus R. A., Ragozzine D., Murray-Clay R. A., Holman M. J.* Identifying Collisional Families in the Kuiper Belt // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 733, № 1. — P. 40.
- [19] *Fuente Marcos C. de la, Fuente Marcos R. de la.* Dynamically correlated minor bodies in the outer Solar system // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2018. — Vol. 474, № 1. — P. 838–846. 1710.07610.
- [20] *Kholshchikov K. V., Kokhirova G. I., Babadzhanyan P. B., Khamroev U. H.* Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 462, № 2. — P. 2275–2283.
- [21] *Kholshchikov K. V., Shchepalova A. S., Jazmati M. S.* On a quotient space of keplerian orbits // *Vestnik St. Petersburg University: Mathematics.* — 2020. — Vol. 53, № 1. — P. 108–114.